



中山大學  
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



国家超级计算广州中心  
NATIONAL SUPERCOMPUTER CENTER IN GUANGZHOU

# 计算机图形学

## C++ 简要回顾

陶钧

[taoj23@mail.sysu.edu.cn](mailto:taoj23@mail.sysu.edu.cn)

中山大学 计算机学院  
国家超级计算广州中心

- 概要
- 预处理器与宏
- 数据类型
- 变量与函数
- 指针与内存
- 类、继承、多态
- 程序优化

- C++：最流行
  - 常用于系统编程，高效
    - 大多数大型游戏都是基于C++开发
  - OpenGL支持最好
    - GLSL非常类似于C/C++
- Java：较流行
- HTML5, Javascript：新潮流
  - 随着网页编程流行而逐渐流行
- C#：新潮流
  - 随Unity而流行

## ◦ 发展

- C: 发行于1972年, 面向过程, 最新标准 (C18)
- C++: 发行于1983年, 面向对象, 最新标准 (C++17)
- 相对JAVA等更接近于低级语言

## ◦ 编译语言

- 由编译器产生机器代码

## ◦ 弱类型语言

- 容忍隐式类型转换

## ◦ 基本控制流

- if, else, else if, switch
- do, while, for, break, continue

## ◦ 发展

- C: 发行于1972年, 面向过程, 最新标准 (C18)
- C++: 发行于1983年, 面向对象, 最新标准 (C++17)

– 相对JAVA等更接近于低级语言

## ◦ 编译语言

"A programming language is **low level** when its programs require attention to **the irrelevant**."

– 由编译器产生机器代码

## ◦ 弱类型语言

- Alan Perlis

– 容忍隐式类型转换

## ◦ 基本控制流

- if, else, else if, switch
- do, while, for, break, continue

## ◦ 发展

- C: 发行于1972年, 面向过程, 最新标准 (C18)
- C++: 发行于1983年, 面向对象, 最新标准 (C++17)
- 相对JAVA等更接近于低级语言

## ◦ 编译语言

- 由编译器产生机器代码

## ◦ 弱类型语言

- 容忍隐式类型转换

## ◦ 基本控制流

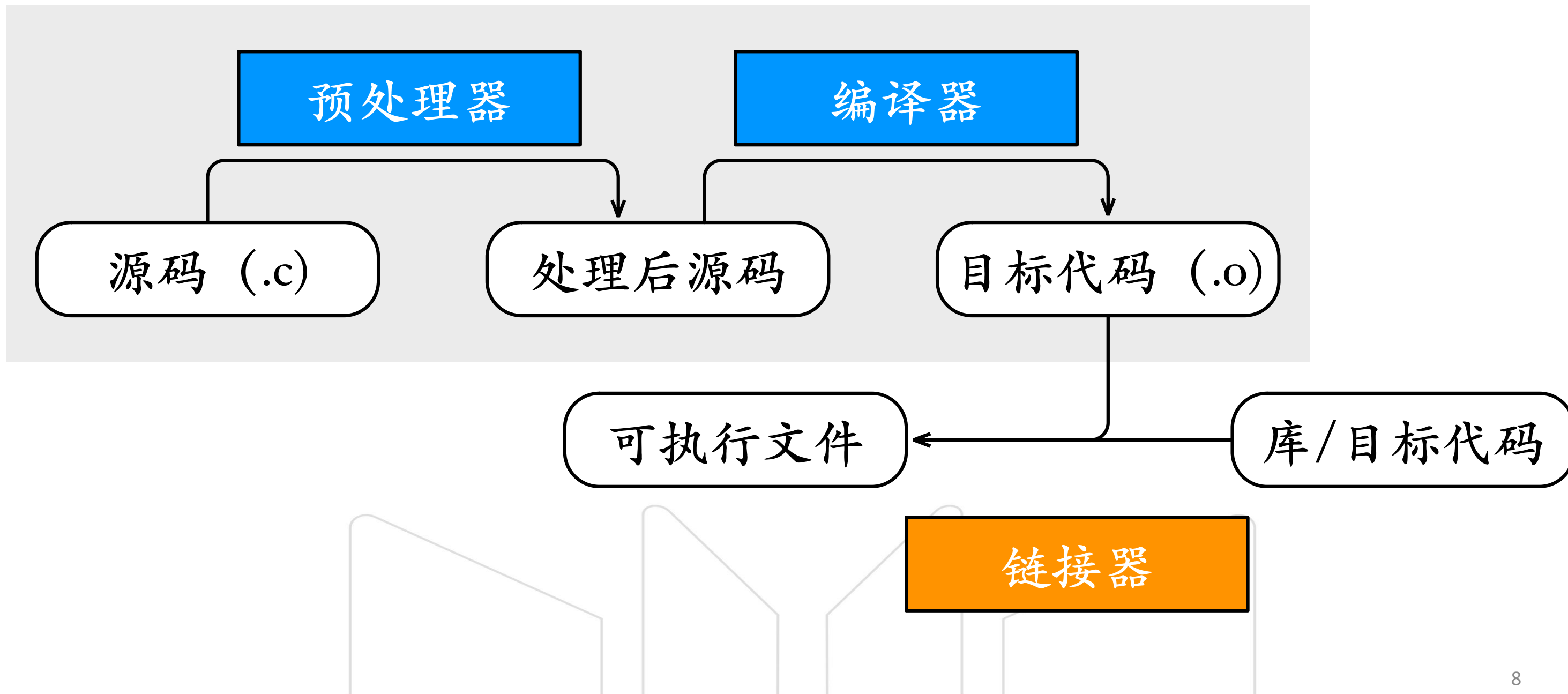
- if, else, else if, switch
- do, while, for, break, continue

## 编译语言

- C/C++
- 编译器将代码转换成机器指令
- 机器指令无法在不同架构上运行
- 通常执行速度更快

## 解释语言

- JAVA、Python
- 执行过程中由解释器转换成指令（但为实时优化提供可能性）
- 通常执行更慢
- 即时编译器技术（Just-in-Time）：实时编译部分代码





## 编程应达到的目标

- 鲁棒，简洁，高效，清晰易懂，可扩展，可测试，可移植

## 良好的编程习惯

- 程序板式：缩进，换行，注释
- 命名规则：清晰（看见名字能直观理解其含义）
  - [https://en.wikipedia.org/wiki/Naming\\_convention\\_\(programming\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Naming_convention_(programming))
- 函数功能划分清晰
  - 功能尽可能单一，规模尽可能小
    - 1986年IBM在OS/360的研究结果：大多数有错误的函数都**大于500行**
    - 1991年对148,000行代码的研究表明：**小于143行**的函数比更长的函数更容易维护
    - debug往往比写程序需要的时间更长

- 概要
- 预处理器与宏
- 数据类型
- 变量与函数
- 指针与内存
- 类、继承、多态
- 程序优化

## • 处理以“#”开头的预处理指令

- #include <header.h>

- 宏 (macro)

- 宏定义

- 本质为文字替换

- 常量宏定义: #define SOME\_VALUE 1024

- 参数宏定义: #define ABS(n) ((n>0)?n:(-n))

- 条件编译

- #if, #elseif, #else, #endif

- #ifdef, #ifndef, defined

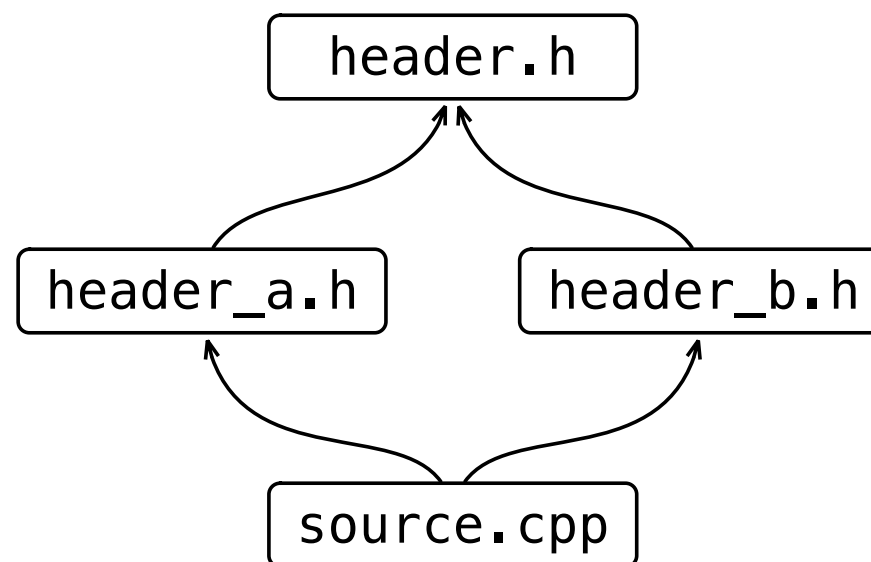
## 宏用途举例

### – 例子1：避免头文件重复编译

```
#ifndef HEADER_H  
#define HEADER_H
```

...

```
#endif //HEADER_H
```



## 宏用途举例

### – 例子2：根据平台编译

```
#if defined(__WINDOWS__) || defined (__WIN32)
    || defined (__WIN32__) || defined (__WIN64)
    LARGE_INTEGER t;
    QueryPerformanceCounter(&t);
#else
    struct timeval t;
    gettimeofday(&t, NULL);
#endif
```

## 容易出错的宏

### – 例子1:

```
#define ARRAY_A_SIZE 20 //数组a大小为20
#define ARRAY_B_SIZE 10 //数组b大小为10
//数组a+b总大小
#define TOTAL_SIZE ARRAY_A_SIZE+ARRAY_B_SIZE
//数组中每个元素包含的浮点数数目
#define NUM_DIMENSION 2

//定义array并分配内存空间
float* array = new float[TOTAL_SIZE*NUM_DIMENSION];
```

访问数组元素array[25\*NUM\_DIMENSION]报错!

## 容易出错的宏

### – 例子1:

期望的代码:

```
#define ARRAY_A_SIZE 20 //数组a大小为20
#define ARRAY_B_SIZE 10 //数组b大小为10
//数组a+b总大小
float* array = new float[(20+10)*2];
```

预处理后的代码:

```
#define TOTAL_SIZE ARRAY_A_SIZE+ARRAY_B_SIZE
//数组中每个元素包含的浮点数数目
#define NUM_DIMENSION 2
float* array = new float[20+10*2];
```

```
//定义array并分配内存空间
float* array = new float[TOTAL_SIZE*NUM_DIMENSION];
```

访问数组元素array[25\*2]报错!

## 容易出错的宏

### – 例子1:

期望的代码:

```
#define ARRAY_A_SIZE 20 //数组a大小为20  
#define ARRAY_B_SIZE 10 //数组b大小为10  
//数组a+b总大小  
float* array = new float[(20+10)*2];
```

预处理后的代码:

```
#define TOTAL_SIZE ARRAY_A_SIZE+ARRAY_B_SIZE  
//数组a与b元素包含的浮点数数目  
#define NUM_DIMENSION 2  
float* array = new float[20+10*2];
```

解决方案:

```
float* array = new float[TOTAL_SIZE*NUM_DIMENSION];  
#define TOTAL_SIZE (ARRAY_A_SIZE+ARRAY_B_SIZE)
```

访问数组元素array[25\*2]报错!



- 容易出错的宏
  - 例子2

```
#define ABS(n) ((n>0)?n:(-n))
```

...

```
ABS(++n);
```

## 容易出错的宏 – 例子2

```
#define ABS(n) ((n>0)?n:(-n))
```

...

```
ABS(++n);
```

调用宏前:  $n=5$   
调用后期待结果:  $n=6$   
调用后实际结果:  $n=7$

## 容易出错的宏

### – 例子2

```
#define ABS(n) ((n>0)?n:(-n))
```

...

```
ABS(++n);
```

调用宏前:  $n=5$   
调用后期待结果:  $n=6$   
调用后实际结果:  $n=7$

实际执行代码:  $((++n>0)?++n:(-(++n)))$

- 概要
- 预处理器与宏
- 数据类型
- 变量与函数
- 指针与内存
- 类、继承、多态
- 程序优化

## 基本类型

- 字符类型: char (1)
- 整型: int (4) , short (2) , long (4) , long long (8)
- 浮点类型: float (4) , double (8)
- 实际长度依赖于具体编译器
  - 可用sizeof ( ) 函数查看具体值

```
int a;  
sizeof(a); //4  
sizeof(int); //4
```

## 自定义类型

- struct, union, class

- 字符类型和整型的符号修饰词
  - signed: 可表示正数和负数
  - unsigned: 只可表示正数（范围是signed的两倍）
- 浮点数的二进制表示
  - 单精度（float）



符号

指数

有效数字

1 bit

8 bits

23 bits

0 00000111 110000000000000000000000000000

+ 7

 $0.5 + 0.25 = 0.75$  $+1.75 \times 2^{(7-127)} = +1.316554 \times 10^{-36}$

## ● C++中进行浮点运算时需要格外注意精度问题

– 浮点型数据在图形学中最为常见

– 精度损失举例

$$1.23456 \times 10^{30} + 9.87654 \times 10^{-30} - 1.23456 \times 10^{30}$$

$$1.23456 \times 10^{30} - 1.23456 \times 10^{30} + 9.87654 \times 10^{-30}$$

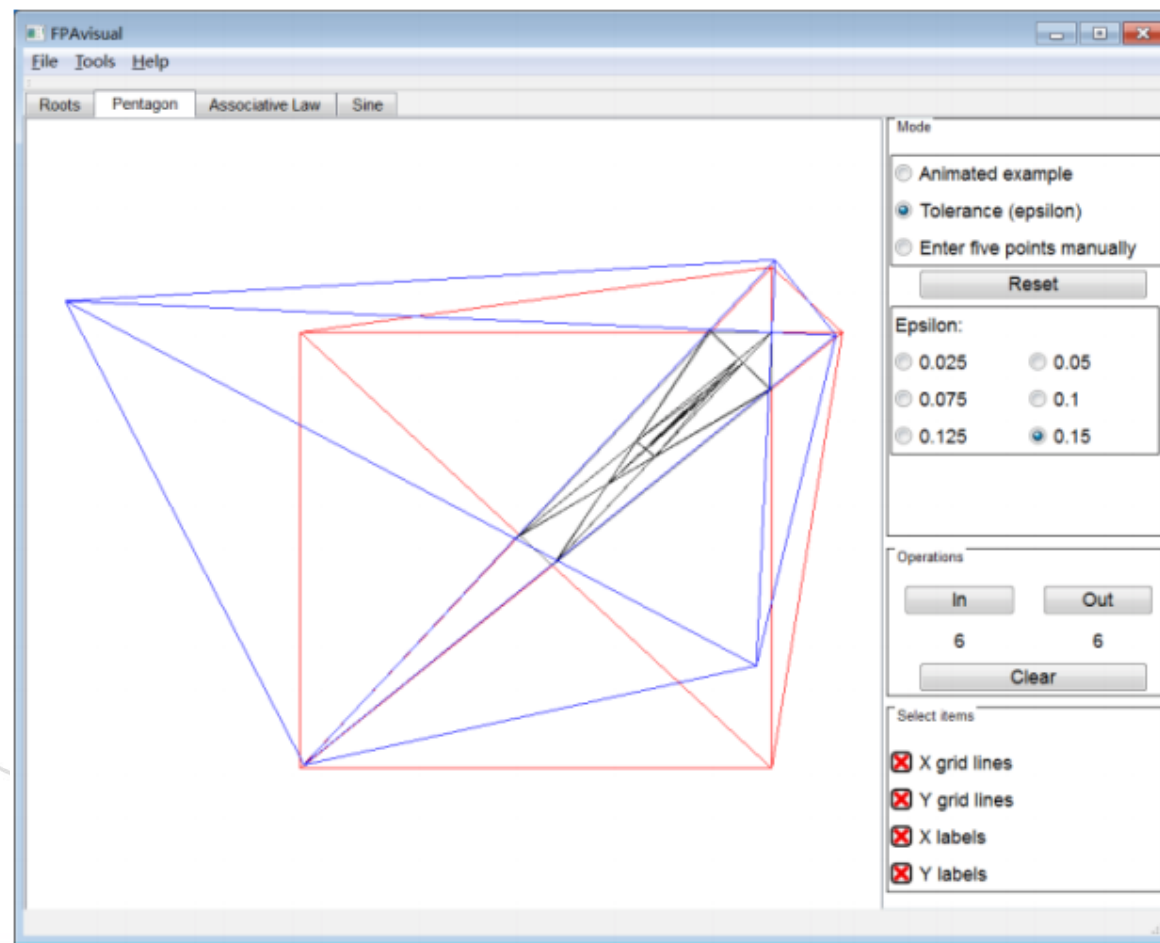
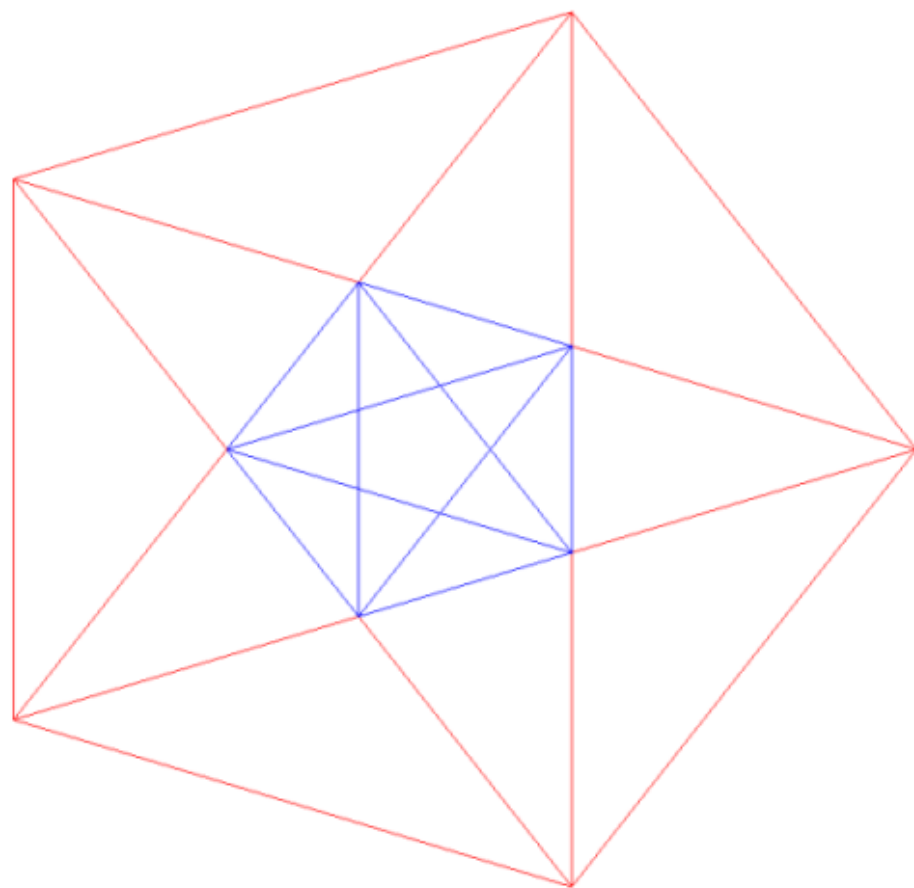
– 此外，在诸如求向量积（cross product），组合数等包含连乘运算的计算时，也要小心精度损失问题

$$\bullet \binom{n}{k} = \frac{n(n-1)\dots(n-k+1)}{k(k-1)\dots 1}$$

– 图形学中比较两个数是否相等时最为常用的语句为

• `if (abs(a-b)<e)` 而非 `if (a==b)`

- C++中进行浮点运算时需要格外注意精度问题
  - FPAvisual: Floating-Point Arithmetic Visualization
    - <http://pages.mtu.edu/~shene/FPAvisual/>
    - 举例：五边形的“in”与“out”操作



红色五边形经过6次“in”与6次“out”后得到的结果为蓝色五边形



## ● 隐式类型转换 (implicit casting)

- 运算数类型不同时由编译器自动转换
- 基本类型遵循以下转换顺序从低向高转换
  - $\text{char} < \text{short} < \text{int} < \text{long} < \text{long long} < \text{float} < \text{double}$
  - 依照计算顺序依次转换

```
int a = 1, b = 2;  
float c = 0.5f;  
float d = (a+c)/b;  
float e = a/b+c/b;
```

d=e?

## ● 隐式类型转换 (implicit casting)

- 运算数类型不同时由编译器自动转换
- 基本类型遵循以下转换顺序从低向高转换
  - $\text{char} < \text{short} < \text{int} < \text{long} < \text{long long} < \text{float} < \text{double}$
  - 依照计算顺序依次转换

```
int a = 1, b = 2;  
float c = 0.5f;  
float d = (a+c)/b;  
float e = a/b+c/b;
```

d=e?

$d = (1+0.5f)/2 = (1.0f+0.5f)/2 = 1.5f/2.0f = 0.75f;$   
 $e = 1/2+0.5f/2 = 0+0.5f/2.0f = 0.0f+0.25f = 0.25f;$

- 隐式类型转换 (implicit casting)
  - 运算数类型不同时由编译器自动转换
  - 自定义类型使用构造函数进行转换

```
class String{  
public:  
    String(const char*);  
    ...  
}
```

```
String s = "some characters";
```

- 等价于

```
String s("some characters");
```

## ● 隐式类型转换 (implicit casting)

- 运算数类型不同时由编译器自动转换
- 自定义类型使用构造函数进行转换

```
class String{  
public:  
    String(const char*);  
    String(const int& n); //初始化字符串为n个空格  
    ...  
}
```

String s = 7;

- 等价于

String s(" ");

- 隐式类型转换 (implicit casting)
  - 运算数类型不同时由编译器自动转换
  - 自定义类型使用构造函数进行转换

```
class String{  
public:  
    String(const char*);  
    String(const int& n);  
    ...  
}
```

```
String s = 'a';
```

- 等价于

```
String s((int)'a') -> String s(97);
```

## ● 隐式类型转换 (implicit casting)

- 运算数类型不同时由编译器自动转换
- 自定义类型使用构造函数进行转换

```
class String{  
public:  
    String(const char*);  
    explicit String(const int& n);  
    ...  
}
```

使用explicit禁止隐式类型转换

```
String s = 97;  
String s = 'a';
```

✗ 编译报错

## 强制类型转换 (explicit casting)

- 使用 (type) 运算符进行转换
- 从高精度向低精度转换时可能损失精度

(int) 1.23456 = 1

(char) 256 = 0

### – 用途举例

```
int a = 1, b = 2;
```

```
float c = 0.5f;
```

```
float d = (a+c)/b;
```

```
float e = a/b+c/b;
```

```
float e = (float)a/b+c/b;
```

```
e = 1.0f/2+0.5f/2 = 0.5f+0.25f = 0.75f;
```

## ◉ 变量定义包括两层含义

– 指明数据位置

– 表明如何理解数据

- 假设有 4 bytes 的数据：00000011111000000000000000000000

- float f:  $1.316554 \times 10^{-36}$

- int i: 65011712



## ◉ 内联 (union)

– 内联的变量对应同一存储空间

```
union {  
    int i;  
    char c[4];  
} INTEGER;
```

```
INTEGER value;  
value.i = 0xdeadbeef;  
swap(value.c[0], value.c[3]);  
swap(value.c[1], value.c[2]);
```

```
value.i : 0xefbeadde;
```

- 概要
- 预处理器与宏
- 数据类型
- 变量与函数
- 指针与内存
- 类、继承、多态
- 程序优化

## ◉ 声明 (declaration)

- 声明向编译器表明变量（函数）的类型和名字

```
extern int a;  
int add(int a, int b);  
extern int add(int a, int b);
```

## ◉ 定义 (definition)

- 定义向链接器表明变量的实际存储空间或函数的具体实现

```
int a;  
extern int a = 1;  
int add(int a, int b){return (a+b);}  
extern int add(int a, int b){return (a+b);}
```

## ◉ const

- 表明该变量的值不可修改，否则编译将报错
  - 常用于全局常量定义或表明函数的参数内容不可修改

## ◉ volatile

- 表明程序每次读写该变量都需要直接对内存进行操作
  - 编译器不能对该变量读写进行优化（如缓存）
  - 为防止该变量被其他程序/设备修改导致数据不一致



## • static

- 表明变量在程序运行中只定义一次

```
void static_inc()  
{  
    static int a = 1;  
    ++a;  
    printf("a = %d\n", a);  
}
```

```
for(int i = 0; i < 5; i++)  
{  
    static_inc();  
}
```

程序输出:

a = 2

a = 3

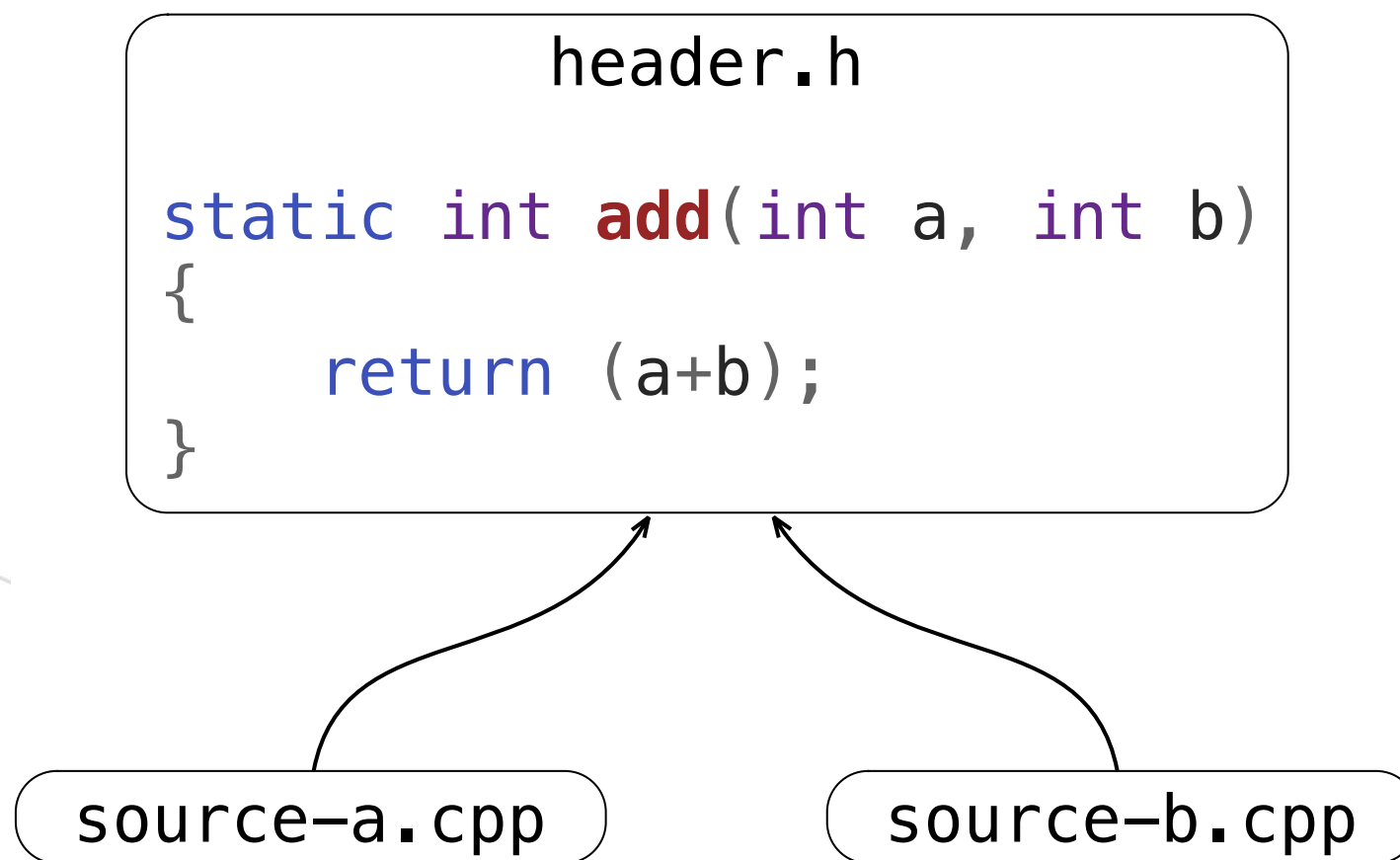
a = 4

a = 5

a = 6

## • static

- 表明函数只能被本文件使用
- 其他文件定义同名函数不会冲突
- 可用来在头文件中定义函数



## ◦ inline

- 表明函数代码将被置入调用行执行
- 避免实际调用函数产生的开销
  - 备份寄存器、分配栈空间、代码跳转等
- 常用于实现代码简短的函数
  - 否则将导致程序膨胀而降低缓存效率
- 添加在函数定义（而非声明）处
- 编译器可能自行决定inline某些函数

```
inline int add(int a, int b)
{
    return (a+b);
}
```

## ◉ inline

- 由编译器处理
- 参数中的语句只会被调用一次
- 可以作为类的成员函数
- 由 { } 决定函数体范围
- 需要匹配参数类型

## ◉ 宏

- 由预处理器处理
- 参数中的语句在宏中的每次出现都会被调用
- 不可以作为成员函数
- 换行表明宏定义结束
- 不需要匹配参数类型



## inline

- 由编译器处理
- 参数中的语句只会被调用一次
- 可以作为类的成员函数
- 由 {} 决定函数体范围
- 需要匹配参数类型

## 宏

- 由预处理器处理
- 参数中的语句在宏中的每次出现都会被调用
- 不可以作为成员函数
- 换行表明宏定义结束
- 不需要匹配参数类型

**“Prefer consts, enums, and inlines to #defines.”**

**-Scott Meyers, Effective C++**

## 函数模板

- 使用template关键字对不同类型数据创建通用函数

不使用模板:

```
int add(int a, int b){  
    return (a+b);  
}
```

```
float add(float a, float b){  
    return (a+b);  
}
```

```
double add(double a, double b){  
    return (a+b);  
}
```

## 函数模板

- 使用template关键字对不同类型数据创建通用函数

不使用模板:

```
int add(int a, int b){  
    return (a+b);  
}
```

```
float add(float a, float b){  
    return (a+b);  
}
```

```
double add(double a, double b){  
    return (a+b);  
}
```

使用模板:

```
template<typename T>  
T add(T a, T b){  
    return (a+b);  
}
```

// 调用举例

```
int a = add<int>(3, 5); // 8
```

- 概要
- 预处理器与宏
- 数据类型
- 变量与函数
- 指针与内存
- 类、继承、多态
- 程序优化

## 指针

- 记录变量内存地址的变量——在图形学编程中十分常见
- 通过星号 (\*) 声明指针
  - `float* f;`
  - `char* c;`
- 通过取地址运算符 (&) 获得变量地址
  - `int i;`
  - `int* p = &i;`
- 不同类型的指针具有同样的大小
  - `sizeof(float*); //4 (32位程序)`
  - `sizeof(char*); //4 (32位程序)`



## 指针与数组

- 动态分配连续内存空间
- 具体运算的值依赖于指针类型

```
float* data = new float[1024];
```

```
char* c = (char*) data;
```

```
float* f = data;
```

*c[0] //data 中第 1 个 byte 对应的字符*

*f[0] //data 中前 4 个 bytes 对应的浮点数*

*++c; //指针向后移动 1 byte*

*++f; //指针向后移动 4 bytes*

## 指针数组

### – 指向指针的指针

- `int a[10][10];`
- `int *b[10];`

### – a是一个 10x10 的二维数组

- 程序将分配大小为100的连续空间

### – b是一个长度为10的一维数组

- 数组中每个元素为一个指针
- 可分别为b中元素分配空间，大小不需要一致，空间上不一定连续

```
for(int i=0; i<10; ++i){  
    b[i] = new int[i+1];  
}
```



## 指针数组

– 分配空间连续的  $n \times m$  二维数组

```
int n = 10, m = 10;  
int **b, *b_data;
```

```
b_data = new int[n*m]; // 为数据分配空间  
b = new int*[n]; // 为一维指针分配空间
```

```
for(int i = 0; i < n; i++)  
{  
    // 将b中每一个指针指向内存中相应位置  
    b[i] = &b_data[i*m];  
}
```

## ◉ 释放内存

- 用户需自行管理分配的内存
- 使用delete[]运算符和free函数

```
int *array = new int[100];  
delete[] array;
```

```
int *array = (int*)malloc(sizeof(int)*100);  
free(array);
```

### – 成对编码

- 在写完分配内存（new/malloc）后，马上写释放内存代码（delete/free）
- 最后在中间填上使用内存的代码

## 指针用途举例

```
void smooth(float* org, float* ret, int n){  
    for(int i = 1; i < n-1; i++)  
    {  
        ret[i] = 0.5f*(org[i-1]+org[i]);  
    }  
}
```

```
float* val = new float[10000000];  
float* smooth_val = new float[10000000];
```

```
for(int i = 0; i < 128; i++)  
{  
    smooth(val, smooth_val, 10000000);  
    memcpy(val, smooth_val, sizeof(float)*10000000);  
}
```

## 指针用途举例

```
void smooth(float* org, float* ret, int n){  
    for(int i = 1; i < n-1; i++)  
    {  
        ret[i] = 0.5f*(org[i-1]+org[i]);  
    }  
}
```

```
float* val = new float[10000000];  
float* smooth_val = new float[10000000];
```

```
for(int i = 0; i < 128; i++)  
{  
    smooth(val, smooth_val, 10000000);  
    swap(val, smooth_val);  
}
```

## 函数指针

### – 声明函数指针

```
int (*func_ptr)(int ,int);
```

### – 使用取地址运算符（&） 函数获取函数地址

```
int add(int a, int b);
```

```
int sub(int a, int b);
```

```
func_ptr = &add;
```

```
func_ptr(5, 2); //7
```

```
func_ptr = &sub;
```

```
func_ptr(5, 2); //3
```

## 函数指针用途举例

### — 将数组中所有元素相加/相减

```
int add(int a, int b);
```

```
int sub(int a, int b);
```

```
void vector_if(int *a, int *b, int* c,  
    int n, int mode)  
{  
    for(int i = 0; i < n; ++i){  
        if(mode==0){  
            c[i] = add(a[i], b[i]);  
        } else {  
            c[i] = sub(a[i], b[i]);  
        }  
    }  
}  
//调用  
vector_if(a, b, c, n, 0);
```

## 函数指针用途举例

### — 将数组中所有元素相加/相减

```
int add(int a, int b);
```

```
int sub(int a, int b);
```

```
void vector_if(int *a, int *b, int* c,  
int n, int mode)  
{  
    for(int i = 0; i < n; ++i){  
        if(mode==0){  
            c[i] = add(a[i], b[i]);  
        } else {  
            c[i] = sub(a[i], b[i]);  
        }  
    }  
}  
//调用  
vector_if(a, b, c, n, 0);
```

```
void vector_fp(int *a, int *b, int* c,  
int n, int (*func_ptr)(int, int))  
{  
    for(int i=0; i<n; ++i){  
        c[i] = func_ptr(a[i], b[i]);  
    }  
}  
//调用  
vector_fp(a, b, c, n, &add);
```

## 函数指针用途举例

### — 将数组中所有元素相加/相减

```
int add(int a, int b);
```

```
int sub(int a, int b);
```

```
void vector_fp(int *a, int *b, int* c,  
int n, int (*func_ptr)(int, int))  
{  
    for(int i=0; i<n; ++i){  
        c[i] = func_ptr(a[i], b[i]);  
    }  
}
```

//调用

```
vector_fp(a, b, c, n, &add);
```

```
#define VECTOR_OPERATOR add
```

```
void vector_macro(int *a, int *b,  
int *c, int n)  
{  
    for(int i=0; i<n; ++i){  
        c[i] = VECTOR_OPERATOR(a[i], b[i]);  
    }  
}
```

//调用

```
vector_macro(a, b, c, n);
```



## 函数指针用途举例

### — 将数组中所有元素相加/相减

```
int add(int a, int b);
```

```
int sub(int a, int b);
```

```
void vector_fp(int *a, int *b, int* c,  
    int n, int (*func_ptr)(int, int))  
{  
    for(int i=0; i<n; ++i){  
        c[i] = func_ptr(a[i], b[i]);  
    }  
}
```

//调用

```
vector_fp(a, b, c, n, &add);
```

```
template<int mode>  
void vector_template(int *a, int *b, int *c)  
{  
    for(int i=0; i<n; ++i){  
        switch(mode){  
            case 0: c[i] = add(a[i], b[i]);  
                break;  
            case 1: c[i] = sub(a[i], b[i]);  
                break;  
        }  
    }  
}
```

//调用

```
vector_template<0>(a, b, c);
```

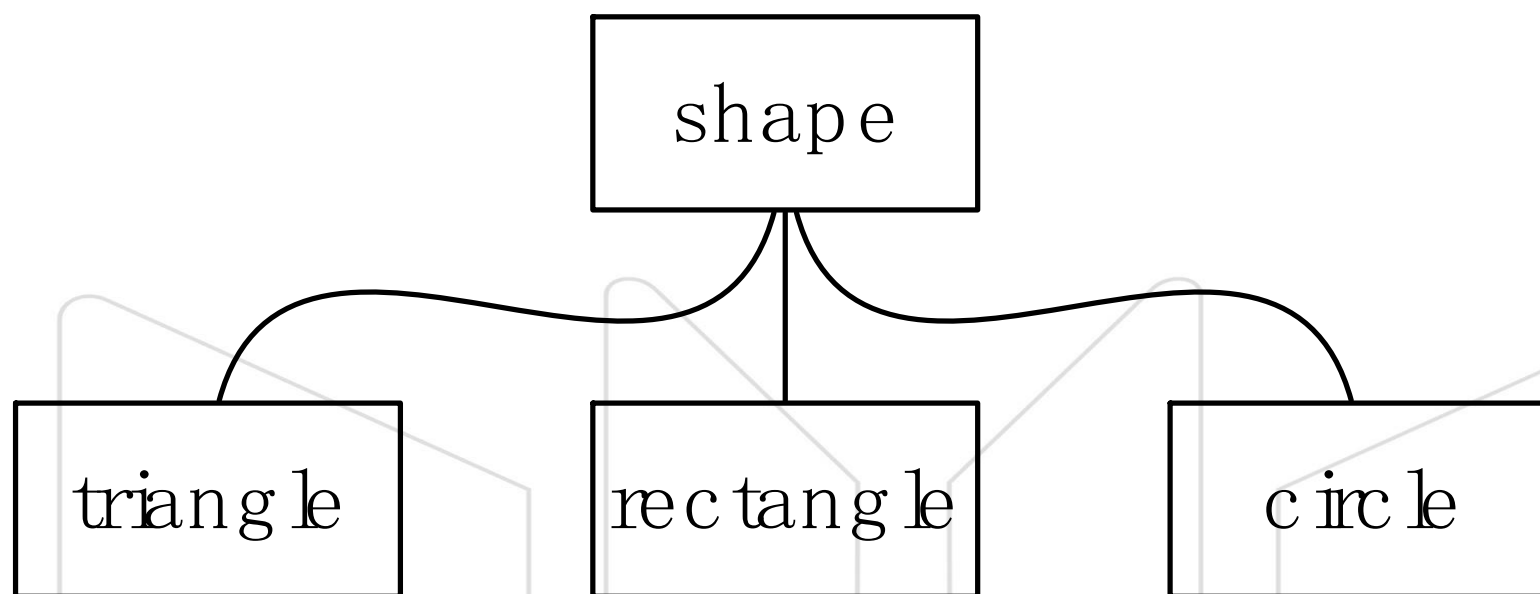
- 概要
- 预处理器与宏
- 数据类型
- 变量与函数
- 指针与内存
- 类、继承、多态
- 程序优化

## ● 面向对象编程

### — 编写较大规模程序时尤为必要

- 使代码模块化
- 继承：实现代码重用
- 派生：改造原有程序，解决其无法（完全）解决的问题
- 多态：简化程序（同一操作对不同可以产生不同解释）

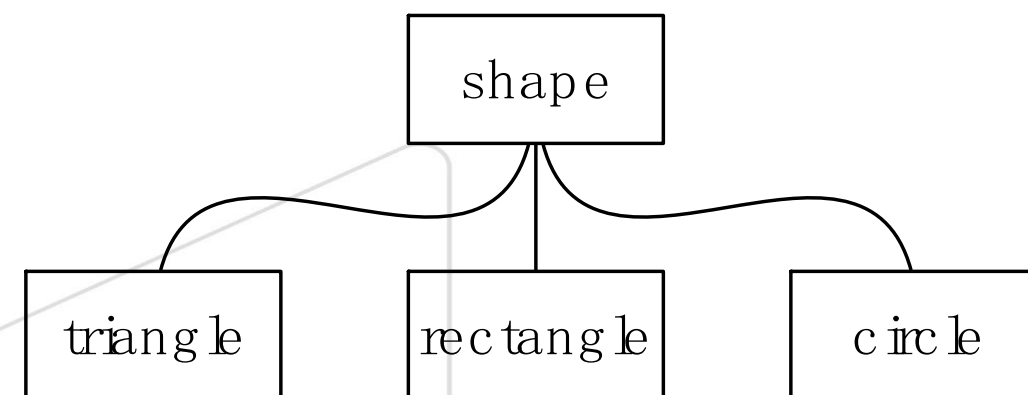
### — 举例



## 基类

### — 抽取共性方法、成员

```
class Shape {  
public:  
    Shape( ... ){}  
  
    void draw(){  
        //默认绘制方式  
    }  
  
    float area(){  
        cout << "Shape area" << endl;  
        return 0;  
    }  
  
protected:  
    std::vector<vec2f> points;  
};
```



## ● 派生类

### — 实现不同类型对象的具体功能

```
class Shape {  
public:  
    Shape( ... ){}  
  
    void draw(){  
        //默认绘制方式  
    }  
  
    float area(){  
        cout << "Shape area" << endl;  
        return 0;  
    }  
  
protected:  
    std::vector<vec2f> points;  
};
```

```
class Rectangle: public Shape{  
public:  
    Rectangle(...):Shape(...) {}  
  
    void draw(){} //画四边形  
  
    float area (){  
        //长x宽  
        cout << "Rectangle area:" ...  
        return a;  
    }  
};
```

继承方式

```
class Triangle: public Shape{  
public:  
    Triangle(...):Shape(...) {}  
  
    void draw(){} //画三角形  
  
    float area (){  
        //海伦公式  
        cout << "Triangle area:" ...  
        return a;  
    }  
};
```

## 应用举例：计算面积和

```
Triangle t1(...);
```

```
Triangle t2(...);
```

```
Rectangle r(...);
```

```
Circle c(...);
```

```
std::vector<Shape> all_objs;
```

```
//将t1, t2, r, c存入all_objs
```

```
float cal_area() {
```

```
    float sum = 0.0f;
```

```
    for (int i=0; i<all_objs.size(); ++i) {
```

```
        sum += all_objs[i].area();
```

```
    }
```

```
}
```

## 应用举例：计算面积和

```
Triangle t1(...);  
Triangle t2(...);  
Rectangle r(...);  
Circle c(...);
```

```
std::vector<Shape*> all_objs;  
//将t1, t2, r, c存入all_objs
```

```
float cal_area() {  
    float sum = 0.0f;  
    for (int i=0; i<all_objs.size(); ++i) {  
        sum += all_objs[i]->area();  
    }  
}
```

输出：

```
Shape area  
Shape area  
Shape area  
Shape area
```

错误原因：

早绑定：**area()**函数在编译期间已经设置好

更正方式：

基类函数声明更改为  
**virtual float area**();

- 概要
- 预处理器与宏
- 数据类型
- 变量与函数
- 指针与内存
- 类、继承、多态
- 程序优化



## ● 基本原理

### — 了解你的程序

- 哪部分耗费时间最多？每部分提升空间如何？

### — 性能优化

- 改进算法、数据结构，降低时间复杂度
- 在时间复杂度无法提高的情况下
  - 优化程序写法，减少不必要的运算，采用消耗较小的运算
  - 优化读写模式，充分利用缓存
- 性能优化举例
  - 强度折减（Strength reduction）
  - 记录可重复使用的信息
  - 循环展开
  - 优化内存访问

## ◉ 强度折减 (strength reduction)

- 将开销高的运算替换为开销较低的运算
- 本小节内容整理自<https://zhuanlan.zhihu.com/p/33638344>

## ◉ 运算开销

- comparison: 1 clock cycle
- (u)int add, subtract, bitops, shift: 1 clock cycle
- floating point add, sub: 3~6 clock cycles
- indexed array access: cache effect
- (u)int32 mul: 3~4 clock cycles
- floating point mul: 4~8 clock cycles
- floating point division: 14~45 clock cycles
- (u)int division, remainder: 40~80 clock cycles

## ● 类型转换

- int to short/char: 0~1 clock cycle
  - short/char 通常使用 32 bits 存储，只是返回时进行截取
  - 只有在数组之类需要考虑内存大小时使用 short/char
- int to float/double: 4~16 clock cycles
- 浮点型常量默认为双精度
  - 避免不必要的转换
  - 对于 `float a, b` 应该使用 `a = b * 1.2` 还是 `a = b * 1.2f` ?
- 使用乘法替代除法
  - 将常出现的除以常数替换成乘以其倒数
  - 对浮点型变量 `double y, a1, a2, b1, b2` 哪种写法更快?
    - `y = a1/b1 + a2/b2`
    - `y = (a1*b2 + a2*b1) / (b1*b2)`

## ● 举例：计算Fibonacci数列

$$- f_0 = 1, f_1 = 1, f_i = f_{i-1} + f_{i-2}$$

- 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, ...

```
int fibonacci(const int& i){  
    if (i<2) {  
        return 1;  
    }  
    return fibonacci(i-1)+fibonacci(i-2);  
}
```

存在问题：重复计算

## ● 举例：计算Fibonacci数列

$$- f_0 = 1, f_1 = 1, f_i = f_{i-1} + f_{i-2}$$

- 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, ...

```
int fibonacci(const int& i){  
    if (i<2) {  
        return 1;  
    }  
    return fibonacci(i-1)+fibonacci(i-2);  
}
```

输出斐波那契数列前40个数字：1.412s

```
int fibo_data[100];  
  
int fibonacci_mem(const int& i){  
    if (fibo_data[i]>0){  
        return fibo_data[i];  
    }  
  
    fibo_data[i] = fibonacci_mem(i-1)  
        +fibonacci_mem(i-2);  
    return fibo_data[i];  
}
```

输出斐波那契数列前40个数字：0.000s

空间换取时间

## 展开循环 (loop unrolling)

### – 使用编译器优化

- gcc -funroll-loops
- 某些编译器的-O3级别优化同样会展开循环

### – 手动展开

```
for(int i=0; i<n; ++i){  
    do_something(i);  
}
```

```
for(int i=0; i<n; ++i){  
    do_something(i); ++i;  
    do_something(i); ++i;  
    do_something(i); ++i;  
    do_something(i);  
}
```

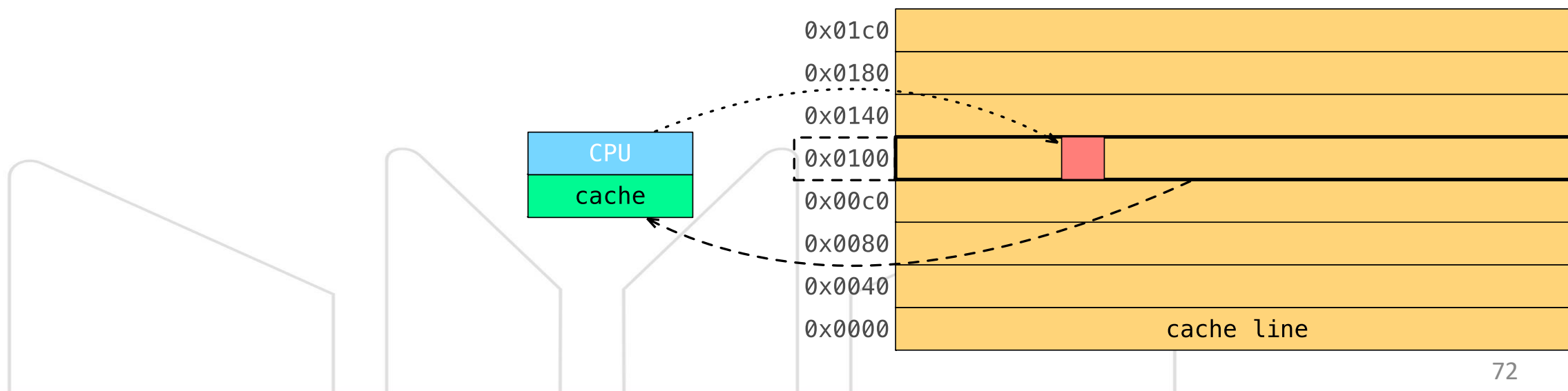
- 展开循环 (loop unrolling)
  - 手动展开同时简化逻辑

```
for (int i=0; i<n; ++i){  
    if (i%2==0){  
        a(i);  
    } else {  
        b(i);  
    }  
    c(i);  
}
```

```
for (int i=0; i<n; i+=2){  
    a(i);  
    c(i);  
    b(i+1);  
    c(i+1);  
}
```

## • 对齐与合并访问

- **cache line**: CPU每次从内存中缓存的数据大小
  - 通常为64B（字节）
  - 从64B的倍数起
- 每次访问内存时，将加载包含该内存地址的一个cache line
  - 此后对同一cache line的访问将通过缓存进行





## • 对齐与合并访问

- cache line意味着访问连续内存空间的重要性
  - C/C++中，数组为row-major（每行在内存中连续）
- 试比较以下代码：

```
#define N 50000
int mat[N][N];

for(int i=0; i<N; ++i){
    for (int j=0; j<N; ++j){
        sum += mat[i][j];
    }
}
```

```
#define N 50000
int mat[N][N];

for(int i=0; i<N; ++i){
    for (int j=0; j<N; ++j){
        sum += mat[j][i];
    }
}
```

## • 对齐与合并访问

- cache line意味着访问连续内存空间的重要性
  - C/C++中，数组为row-major（每行在内存中连续）
- 试比较以下代码：

```
#define N 50000
int mat[N][N];

for(int i=0; i<N; ++i){
    for (int j=0; j<N; ++j){
        sum += mat[i][j];
    }
}
```

运行时间：5.414秒

```
#define N 50000
int mat[N][N];

for(int i=0; i<N; ++i){
    for (int j=0; j<N; ++j){
        sum += mat[j][i];
    }
}
```

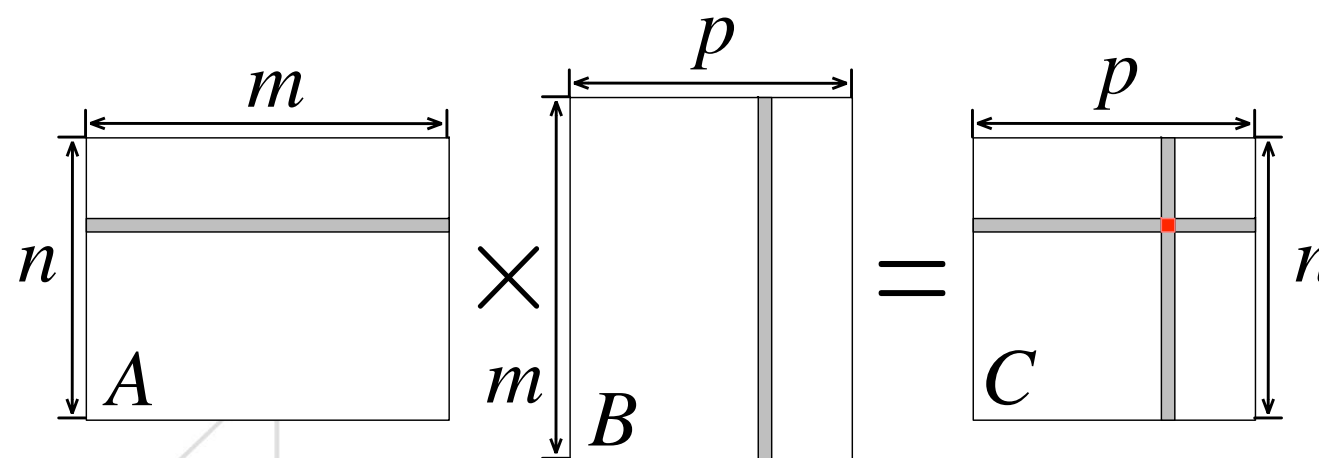
运行时间：35.708秒

## • 对齐与合并访问：CPU

- cache line意味着访问连续内存空间的重要性
  - C/C++中，数组为row-major（每行在内存中连续）
- 在矩阵乘法中，常见写法容易不自觉地使用column-major的访问模式

```
#define N 3000
int A[N][N], B[N][N], C[N][N];

for(int i=0; i<N; ++i)
  for(int j = 0; j<N; ++j)
    for(int k = 0; k < N; ++k)
      C[i][j] += A[i][k] * B[k][j];
```



## • 对齐与合并访问：CPU

- cache line意味着访问连续内存空间的重要性
  - C/C++中，数组为row-major（每行在内存中连续）
- 在矩阵乘法中，常见写法容易不自觉地使用column-major的访问模式

```
#define N 3000
int A[N][N], B[N][N], C[N][N];

for(int i=0; i<N; ++i)
    for(int j = 0; j<N; ++j)
        for(int k = 0; k < N; ++k)
            C[i][j] += A[i][k]*B[k][j];
```

运行时间：231.348秒

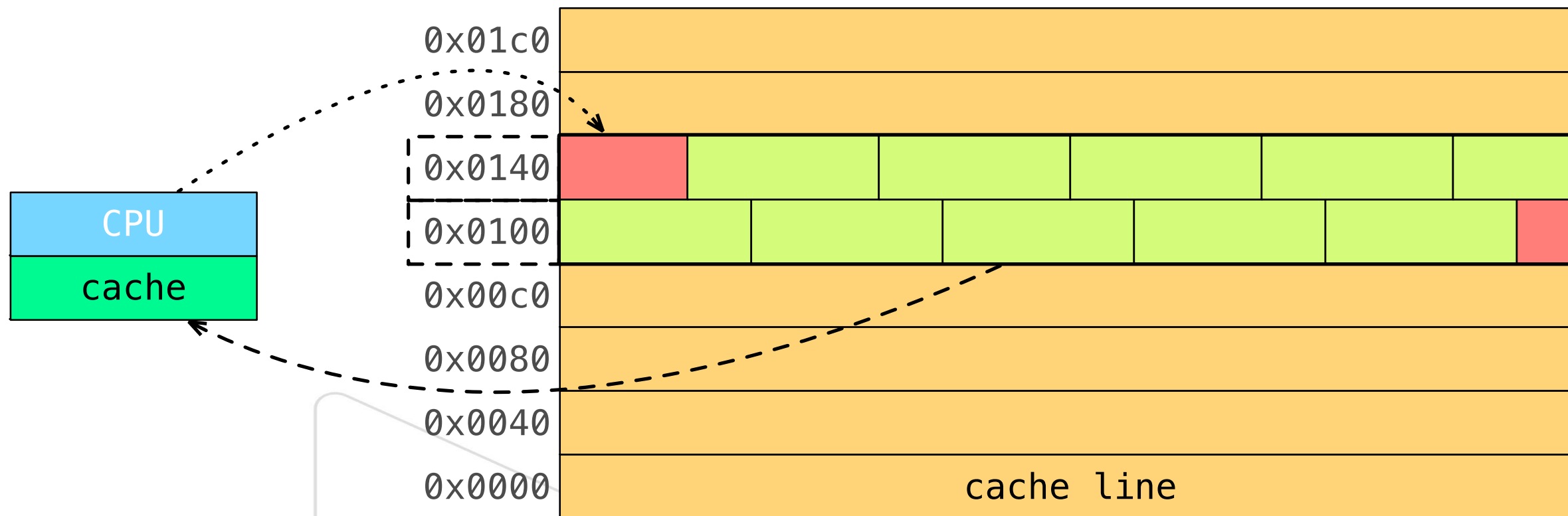
```
#define N 3000
int A[N][N], B[N][N], C[N][N];

for(int i=0; i<N; ++i)
    for(int k = 0; k<N; ++k)
        for(int j = 0; j<N; ++j)
            C[i][j] += A[i][k]*B[k][j];
```

运行时间：72.557秒

## • 对齐与合并访问

- 非对齐存储可能导致对一个数据的读取需要载入两个cache lines
  - 使用 `__align__(n)` 强制对齐
  - `n` 必须为2的幂次方



## • C程序优化

- Michael E. Lee, Optimization of Computer Programs in C
  - [http://icps.u-strasbg.fr/~bastoul/local\\_copies/lee.html](http://icps.u-strasbg.fr/~bastoul/local_copies/lee.html)
- Lucas A. Wilson, Serial & Vector Optimization
  - [https://portal.tacc.utexas.edu/documents/13601/1041435/06-Serial\\_and\\_Vector\\_Optimization.pdf/4eef1e1c-7592-4ac4-8608-1f0662553a88](https://portal.tacc.utexas.edu/documents/13601/1041435/06-Serial_and_Vector_Optimization.pdf/4eef1e1c-7592-4ac4-8608-1f0662553a88)
- ali4846j3o, C++性能优化（知乎专栏）
  - <https://zhuanlan.zhihu.com/p/33638344>

## ◉ C++概要

- 编译语言，执行效率高
- 当前计算机图形学中最常见的语言
  - 在大型游戏、动画尤为常用

## ◉ 预处理器与宏

- 本质为文字替换，使用灵活，但不安全易出错

## ◉ 数据类型

- 类型声明决定如何理解二进制数据
- 对浮点型数据的计算要尤其注意精度问题

## ◉ 指针与内存

- 活用指针能极大提高程序效率，但要注意内存管理

## ◉ 类、继承、多态

- 程序模块化的关键：基类提供共用属性、方法、接口；派生类实现多态

## ◉ 性能优化举例

- 了解程序瓶颈所在，注重程序写法与实际运算、内存访问模式之间的关系

# Questions?

